



シリーズ：内部被ばくの簡易測定（スクリーニング）

第2回 軟β核種（ ^3H , ^{14}C 等）による内部被ばくの評価

馬田 敏幸

1. はじめに

トリチウム（ ^3H 又はT）や放射性炭素（ ^{14}C ）に代表される軟β線放出核種による被ばくは、体内摂取による内部被ばくが問題となる。体内放射能の直接測定が不可能なこれらの核種では、バイオアッセイが必要となる。本稿では、トリチウムと放射性炭素による内部被ばくの評価について解説する。

2. トリチウムの代謝的特質

2-1. トリチウムの性質

トリチウムは水素の同位体の中で最も質量数の大きい放射性同位体である。自然環境では、トリチウムは分子式 T_2 の無色の引火性の高い二原子ガスである。トリチウム原子核は不安定で、β⁻線と反ニュートリノを放出し、安定な ^3He に壊変する。



トリチウムの物理的半減期は12.3年で、純粋な元素状態での比放射能は $3.56 \times 10^{14} \text{Bq/g}$ である。放出されたβ⁻線は非常に低いエネルギーで、平均5.7 keV、最大18.6 keVである。水中でのβ⁻線の平均飛程は0.56 μm、最大飛程は6 μmである。因みに典型的な細胞の直径は10~100 μm、細胞核の直径は6~15 μmである。トリチウムβ⁻線はプラスチック、ガラス又は金属のシートによって完全に吸収される。トリチウムβ⁻線は皮膚の角質層を透過できないので外部被ばくの問題はないが、体内に取り込まれた場合は、β⁻線により内部被ばくする。

2-2. トリチウム水の体内挙動

トリチウムは、トリチウム水（HTO, T_2O 、以下HTOで代表する）の形で自然環境及び作業環境中に最もよく見られ、 H_2O と同じ化学的性質を持っている。HTOは吸入、皮膚呼吸（液体及び蒸気）及

び水又は食物の経口摂取により、容易に体内に取り込まれる（図1）。取り込まれたHTOは体内の水分と急速に混ざって平衡になり、特別な標的器官はなく一様に分配される。すべての軟部組織、汗、痰、尿、血液、発汗及び呼気水蒸気中のHTOの濃度は4時間程度で等しくなる。HTOは尿、糞便、汗及び呼気を介して排泄される。

トリチウム化された元素状水素（HT又は T_2 ）は生物系では比較的不活性であり、体液や組織への取込みは少ない。人は主に吸入又は汚染された表面と皮膚との接触によってHTにさらされる。吸収されたHTのごく一部は、体内でHTOに変換される。

トリチウム原子は通常の水素原子と交換可能であるため、植物や動物に吸収されたトリチウムの一部は炭水化物、脂肪、タンパク質、コラーゲン等の有機化合物に取り込まれる。これは有機結合型トリチウム（OBT；organically bound tritium）と呼ばれる。人間を含む動物はOBTを摂取し、また、組織内でHTOからOBTを形成する。炭素原子に結合したOBT中のトリチウム原子は、化合物が代謝されるまで本質的に固定されている（すなわち、トリチウ

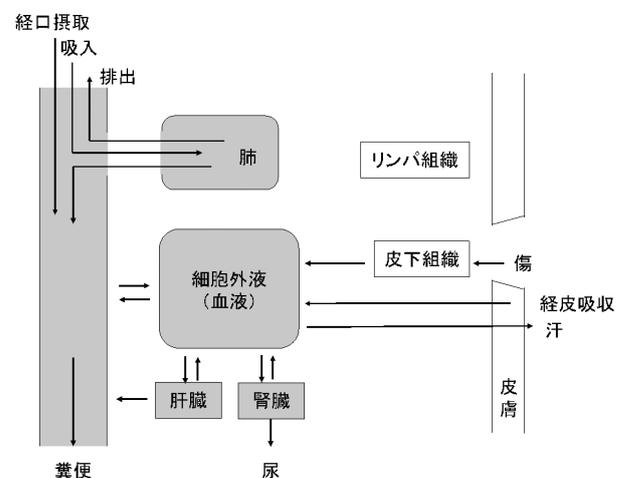


図1 HTOの代謝経路（ICRP publ.78 改変）

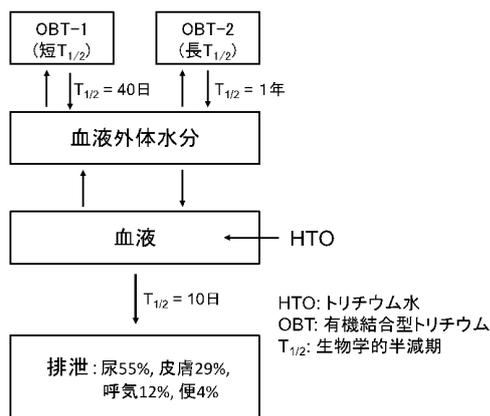


図2 HTO 体内動態挙動モデル (publ. 134 改変)

ムは交換不可能である)。したがって、OBTは体内でHTOよりも長い生物学的半減期を示す。

2-3. HTO の体内動態挙動モデル

ICRPは、放射性核種の職業的摂取に焦点を当てて、生理学的により本物に近い改訂モデルを開発した¹⁾。ここではHTO全身モデルを示す(図2)。HTO全身モデルは、血液を表す区画、血液と急速に交換する血管外体水分、及び体内でOBTに変換された2つのトリチウム保持成分を含む。血液から排泄物への移動係数は、体からの半減期が10日になるように設定されている。区画OBT-1及びOBT-2から血管外体水分へ戻る伝達係数はそれぞれ40日と1年の半減期に対応する。血液からの排泄経路は、水分収支の参考データに基づいて以下の区分が想定されている²⁾。尿、55%。便、4%。呼気、12%。そして皮膚からの損失(汗と不感蒸泄)、29%。

3. 体内汚染の個人モニタリング

放射線障害防止法では、放射線業務従事者に対して放射性同位元素を摂取する恐れのある場所に立ち入る場合や、誤って摂取した場合に内部被ばくによる線量評価を行わなければならない。

放射線業務従事者が、放射線作業によりトリチウム水蒸気を吸入摂取した場合の摂取量及び実効線量の評価は、トリチウムはβ線のエネルギーが小さく体外から直接測定することが困難なので、尿試料を用いたバイオアッセイ法により行われる。尿試料は、採取や取扱いの容易さからモニタリングの試料として、一般的に用いられる。



図3 尿中トリチウム測定の前処理試料調製法³⁾

内部被ばくによる実効線量の算定法は、吸入摂取及び経口摂取した放射性同位元素の摂取量を算定し、単位放射能の摂取による実効線量の算定が可能な線量係数(Sv/Bq)を用いて、内部被ばくによる実効線量を算出する。

$$H = e \times I$$

H: 内部被ばくによる実効線量

e: 実効線量係数として、吸入摂取又は経口摂取に係る実効線量係数

I: 放射性同位元素の吸入摂取量又は経口摂取量

3-1. 尿中³Hからの線量評価

トリチウムの体内摂取量の推定のために、尿中トリチウム濃度の測定を行う。液体シンチレーションカウンタ(LSC)による測定に際しては、採取尿の前処理を行う方法と前処理を行わずに直接測定する方法がある。前処理は、主にLSC測定時のクエンチング(主に色クエンチング)を減少させ、不純物核種を除去する目的で行われ、活性炭粉末やイオン交換樹脂カラムが使用される。前処理を行うことによって、計数効率を高めることができる。図3に処理の例を示す。24時間分の尿から数10mLを採取し、尿試料とする。

ここで、HTOの体内汚染が疑われる場合の、尿中トリチウム量(24時間分の尿)から実効線量を求める算出法を示す。

設定

尿試料はHTO摂取2日後の24時間分(48~72時間): 1.4 L

トリチウム濃度: 10,000 Bq/L 尿(1.4 × 10⁴ Bq/全尿)

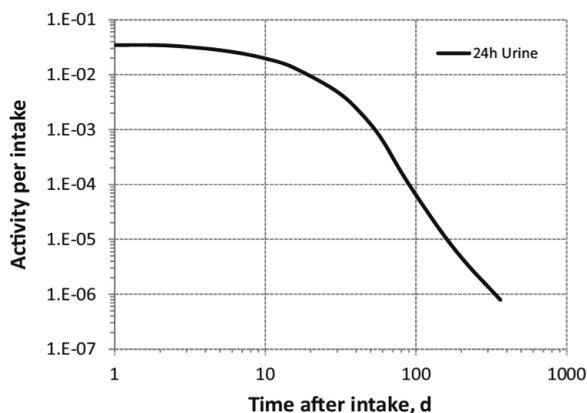


図4 HTOの急性吸入後の尿中³H排泄率¹⁾

表1 吸入による実効線量係数の例¹⁾

核種	吸入ガスあるいは蒸気	実効線量係数
H-3	トリチウム水(HTO)	2.0E-11
	トリチウムガス(HT)	2.0E-15
	トリチウム化メタン(CH4-xTx)	5.9E-14
	不特定ガスあるいは蒸気	2.0E-11
吸入微粒子物質(5μm AMAD エロゾル)		
	タイプF, 生物有機化合物(OBT)	3.5E-11
	タイプF, LaNi4.25Al0.75Tx	1.3E-11
	タイプM, ガラス片, 発光塗料, トリチウム化チタン, トリチウム化ジルコニウム, 全ての不特定化合物	2.4E-11
	タイプS, トリチウム化炭素, トリチウム化ハフニウム	2.6E-10

AMAD: 空気力学的放射能中央径

計算

1 Bq の HTO の吸入摂取に対する尿中放射能を示す排泄率曲線 (図4) より, 摂取から2日後の尿中排泄率は 3.4×10^{-2} と読み取れるので, 摂取量(Bq) = 1.4×10^4 (Bq) $\div 3.4 \times 10^{-2}$ = 4.1×10^5 Bq となる。

HTO の実効線量係数は, 表1 から 2.0×10^{-11} Sv/Bq なので, 実効線量(mSv) = 4.1×10^5 (Bq) $\times 2.0 \times 10^{-11}$ (Sv/Bq) $\times 10^3$ = 8.2×10^{-3} mSv となる。

3-2. 呼気水中³Hからの線量評価

線量評価のより簡便な方法として, トリチウムの場合には呼気を用いる推定方法もある。HTO の水蒸気を吸入摂取した場合, その一部が呼気中に排出されるので, 呼気中のトリチウム濃度を測定すること

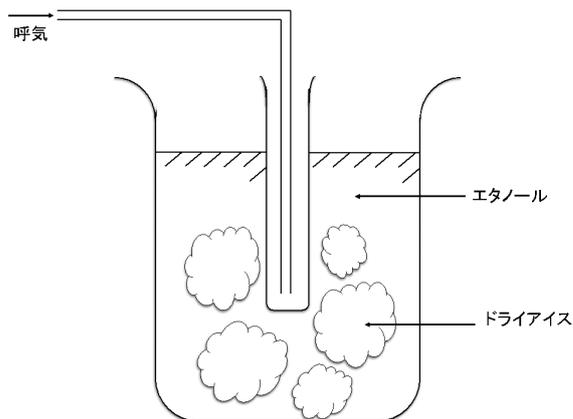


図5 呼気中の水蒸気捕集法

により, 体内量を推定することができる。呼気の測定値と体内量を結びつけることはトリチウムの場合容易であり, 吸入約3時間後には呼気水中と尿中トリチウム濃度はほぼ一致する。例えば, HTO の大量取扱作業等の後に, HTO の摂取があったかどうかをコールドトラップ法 (図5) により呼気を水として捕集して確認することができる。この簡易捕集法は冷エタノールに浸した試験管にプラスチックストローを使って, 吸入3時間後に呼気を約5分間吹き込み, 呼気水としてトラップする方法である。捕集した呼気水はその水量を測定した後バイアル瓶に入れ, 水試料測定用液体シンチレータを添加し, LSCで測定する。

HTO の摂取量を推定するには, 成人の場合, 体重70 kg の人で42 kg の水を全身に保有しているので, 測定により得られたトリチウム水濃度に体内量42 kg を乗じることにより得られる。

4. ¹⁴Cの体内挙動

Cの同位体のうち人体汚染が問題になるのは¹⁴Cであり,¹⁴Cによる作業員への被ばくとして考慮されている化学形は, 一酸化炭素, 二酸化炭素及び有機化合物が最も重要な被ばく源とされている。放射されるβ線の放射線エネルギーは小さく飛程が非常に短いため, 外部被ばくのリスクは殆ど無い。Cは全身に広く分布し, 特定の器官に濃縮・残留することはないために, 内部被ばくの影響も比較的少ないと言える。また, 二酸化炭素として吸引した場合の被ばく量は非常に小さいので問題とする必要はないが, 有機物として長期間にわたって大量摂取した場

合には、その限りではない。

^{14}C 標識化合物の摂取後の体内動態は、その化合物の性質に依存して挙動するので、その代謝を概説するのは困難である。体内に取り込まれた ^{14}C の一部は人体の構成成分として代謝の遅い部分に取り込まれる場合もあるが、最終的には代謝されたものは $^{14}\text{CO}_2$ に変化する。

5. ^{14}C の内部被ばく評価

呼吸中の ^{14}C の測定は二酸化炭素に代謝された ^{14}C 標識有機化合物による体内汚染のモニタリングに有利であるが、日常的な使用法に関する技術的な情報が無い。したがって、尿試料から ^{14}C の摂取量を推定する。

^{14}C はトリチウムに比べて β 線エネルギーが大きく、クエンチングによる計数効率の低下はトリチウムより小さいので、前処理は必要ない。

ここでは不特定の ^{14}C 標識有機化合物を摂取した時の、尿中 ^{14}C (24 時間分の尿) から実効線量を求める算出法を示す。

設定

尿試料は不特定の ^{14}C 標識有機化合物摂取 2 日後の 24 時間分 (48~72 時間) : 1.4 L

^{14}C 濃度 : 3,000 Bq/L 尿 ($4.2 \times 10^3 \text{ Bq}$ / 全尿)

計算

1 Bq の不特定の ^{14}C 標識有機化合物の吸入摂取に対する尿中放射能を示す排泄率曲線 (図 6) より、摂取から 2 日後の尿中排泄率 2.0×10^{-2} が得られる。従って、

$$\begin{aligned} \text{摂取量 (Bq)} &= 4.2 \times 10^3 \text{ (Bq)} \div 2.0 \times 10^{-2} \\ &= 2.1 \times 10^5 \text{ Bq} \end{aligned}$$

となる。

$$\begin{aligned} \text{実効線量係数は表 2 から } &1.7 \times 10^9 \text{ Sv/Bq} \text{ なので、} \\ \text{実効線量 (mSv)} &= 2.1 \times 10^5 \text{ (Bq)} \times 1.7 \times 10^9 \text{ (Sv/Bq)} \\ &\quad \times 10^3 \\ &= 3.6 \times 10^4 \text{ mSv} \end{aligned}$$

となる。

6. 終わりに

Publication 134 で最新の研究データを基により生理的な動態モデルが開発され、作業員による放射性

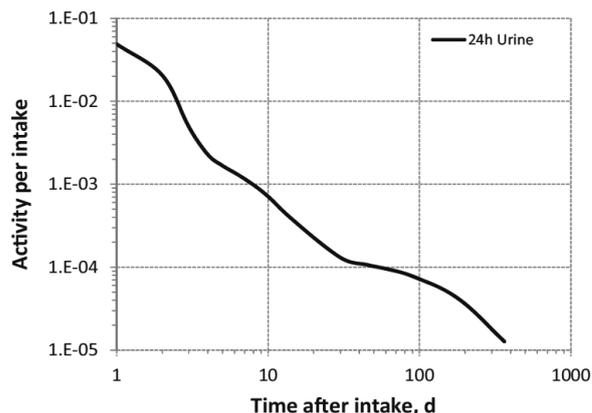


図 6 不特定の ^{14}C 標識有機化合物の急性吸入後の尿中 ^{14}C 排泄率¹⁾

表 2 吸入による実効線量係数の例¹⁾

核種	吸入ガスあるいは蒸気	実効線量係数
C-14	一酸化炭素(CO)	1.8E-12
	二酸化炭素(CO2)	1.3E-10
	メタン(CH4)	5.1E-10
	不特定	1.7E-09
吸入微粒子物質(5 μm AMAD エーロゾル)		
	タイプF, 炭酸バリウム	1.3E-11
	タイプF	1.1E-10
	タイプM, 全ての不特定形	5.8E-10
	タイプS, 元素状炭素, トリチウム化炭素	6.7E-09

AMAD: 空気力学的放射能中央径

核種の摂取についての実効線量係数が改訂された。結果的にトリチウム水の実効線量係数は 25% 大きくなった。

事故はいつ起こるか分からないので、日頃から備えておくことが肝心である。この解説が、RI 管理の一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) ICRP Publication 134, Occupational Intakes of Radionuclides : Part 2, Annals of the ICRP, Vol. 45 No. 3/4 (2016)
- 2) ICRP Publication 89, Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection Reference Values, Annals of the ICRP, Vol.32 No. 3/4 (2002)
- 3) 糠沢敦, 他, 液体シンチレーション計測技術 (VIII) 放射線管理への利用, RADIOISOTOPES, 24, (8), 60-71 (1975)

(産業医科大学アイソトープ研究センター)